Matlab GUI를 활용한 Gerotor 치형 설계 도구 개발
Design Tool Developments of the Gerotor tooth using Matlab GUI

장 주 섭
J. S. Jang

Key Words: Gerotor Profiles(지로터 치형), Lubrication Pum(윤활 펌프), Actuator Pump(작동용 펌프), MATLAB GUI(매트랩 그래픽사용자 인터페이스), Automatic design system(자동화 설계 장치)

Abstract: A geortor type pump is widely used in lubrication and actuator systems. Especially the pump is an essential machine element of an automotive engine to feed lubrication oil and power source of automatic transmission. A gerotor is a planar mechanism consist of a pair of rotor and circular tooth of stator assembly which forms a closed space. However, related industries do not have necessary technology to design and optimize the pump and paid royalties of gerotor profile on an advanced company. Also, gerotor profiles with setting design parameter have not been sufficiently analyzed from a theoretical view. Therefore, it is very difficult for designer to decide the specifications of the gerotor profiles, and calculation and fluctuation of flow rate is not yet confirmed. In this study, theoretical analyses and optimal design of the gerotor profiles have been performed numerical method by mathematical base. An automated design system of the tooth profile has been developed through MATLAB GUI Program considering various design parameters.

기호 설명

A_{inner} : 내부로터의 폐곡선 면적
A_{outer} : 외부로터의 폐곡선 면적
e : 내부 및 외부로터 중심사이의 거리
N : 내부로터의 로브 수
O : 내부로터의 중심
O' : 외부로터의 중심
Q : 토출 유량
Rc : 궤적원의 반경
Rf : 외부로터의 필렛 반경
Rh : 기초원의 반경
$Rini$: 내부로터의 내부 치형 반경
$Rino$: 내부로터의 외부 치형 반경
Ro : 외부로터의 원형 치형 반경
Rou : 외부로터의 외부 반경
Rr : 롤링원의 반경
t : 로터의 두께
Θ : 기초원의 회전각도
ϕ : 롤링원의 회전각도

접수일: 2010년 6월 9일
장주섭(발표자): 경원대학교 기계자동차공학과
E-mail: jsjang@kyungwon.ac.kr
Tel: 031-750-5652

1. 서 론

정용량형 내접기어 펌프는 내접기어의 치형과 합성하여 만들어진 스퍼어 기어나 원곡선을 변형하여 사용하고 있다. 임의의 곡선으로 만들어진 로브를 갖는 지로터(gerotor)펌프는 내부로터와 외부로터로 구성되어 있으며, 구조가 간단하고 소결제품의 생산기술 발달로 가공 정밀도가 높아지고 있어 형상이 복잡하더라도 가공이 용이하고 부품수가 적어 조립이 쉽고, 내부로터와 외부로터사이에 상대운동이 적으므로 장기간 사용하여도 체적효율의 변화가 적고, 흡입 성능이 우수하여 피스톤 펌프이 전단부에 결합된 2연 펌프(tandeum pump)의 흡입 펌프로 널리

사용되고 있다. 특히 다른 기어펌프에 비하여 소음이 적어 엔진 윤활을 위한 윤활유 공급원이나 자동변속기에서 유압을 발생시키는 것으로 널리 사용되고 있다. 또한 전체 체적에 비하여 외접기어나 베인 펌프보다 1회전당 토출 유량이 많은 장점을 가지고 있어서 현재 생산되고 있는 승용차에는 지로터 치형을 이용한 펌프가 대부분 적용되어 사용되고 있는 실정이다[1].

이런 이유로 지로터 치형 설계와 관련된 연구가 최근에도 지속적으로 수행되고 있거나 연구가 진행되고 있다[1~8]. 그 내용을 자세히 살펴보면 Tsay[2] 등은 외부로터를 기준으로 내부로터를 설계하는 로터의 수학적인 모델링 방안을 제안하여, 가공시 두 로터 사이에 간격이 존재하여야 원활한 작동이 될 것이라는 현실적인 모델을 제안하였으며, Seagusa[3] 등은 트로코이드 곡선에 대한 이론적인 해석결과를 나타내었고, 이것을 이용하여 외부로터 및 내부 로터를 설계하는데 있어 내부 로터를 고정시키고 원형의 외부로터를 설계하는 것으로 두 치형 사이의 간극을 일정하게 유지하는 궤적을 구하고 변형 치형을 구하는 수학적인 모델을 제안하였다. Kim[4] 등은 내부로터의 형상은 곡선족으로 내부로터를 이루는 내접점의 좌표를 단위 접선 벡터를 이용하여 결정하였고, 원호 치형 개수, 편심량과 원호 치형 반경의 변화에 따른 지로터의 출력 토크 변화를 관찰하고 접촉부의 응력을 고려하여 등가곡률의 변화를 관찰하였다. 반면에 Kim[5~6] 등은 치형의 기하학적인 고려와 시스템적인 특성을 고려한 구성방정식을 만족하는 치형을 CAD와 AutoLISP을 활용하여 설계하는 방안을 제안하였다. 최근에 Kwon[7] 등은 내부로터와 외부로터 사이에서 발생하는 접촉력의 결정에 대한 이론적인 배경을 바탕으로 내마멸 최적화를 실변수 유전자 알고리즘을 이용하여 수행하였다. 지금까지의 많은 연구는 이론적인 연구에 치중하였고, 설계된 치형의 특징을 확인하는데 다양한 프로그램을 이용해야하는 등 설계 현장에서 사용하는데 현실성이 결여되어 있어 설계시 많은 문제점을 내포하고 있다.

본 연구에서는 치형 설계를 위한 이론해석을 수행하고, 이런 해석결과를 이용하여 수치해석 등 공학적인 해석에 많이 활용되고 있는 Matlab GUI를 활용하여 윤활용 펌프와 구동용 모터에 널리 활용되고 있는 지로터 치형을 편리하게 할 수 있는 설계 도구를 개발하고자 한다.

2. 수학적인 해석과 모델링

2.1 로터 치형 설계를 위한 해석

자동차에 많이 사용되고 있는 지로터 형상의 펌프의 조립된 형상에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 내부로터를 구동시키게 되면 외부로터가 미끄럼 접촉하면서 회전하게 되어 두 치형 사이에서 발생된 공간의 변화로 인하여 흡입과 토출이 발생하는 것으로 두 치형은 항상 접촉한 상태로 회전하게 된다.

내부로터는 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 트로코이드 곡선을 이용하여 설계하게 되고, 이 로터를 기준으로 하였을 때 외부로터의 치형은 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 일반적으로 많이 사용하고 있는 원형형상과 타원(elliptical)형상, 정현(sinusoidal)형상으로 설계하지만 대부분은 설계의 편리성과 가공의 편리성으로 인하여 반경이 일정한 원호형상을 사용하고 있다. 외부로터는 내부 로터보다 로브(lobes)의 수가 1개 더 많고 일정한 편심거리 e를 가지고 하우징의 중심축을 기준으로 회전하게 되는데, 펌프로 사용되는 경우는 내부로터의 구동력으로, 모터로 사용되는 경우도 대부분은 내로로터와 축을 연결하여 동력을 이용할 수 있도록 회전하게 된다.

내부로터를 회전시키면 외부로터의 접촉점이 이동하면서 편심거리에 따라 두 로터사이에는 공간이 점점 크게 발생함으로서 이 공간사이 작동유나 윤활유가 흡인력에 의하여 흡입되고, 시작점을 기준으로 180° 이후부터는 공간이 점점 작아지면서 토출측으로 토출 시키게 된다. 두 로터가 상대적으로 미끄러지면서 동시에 회전하기 때문에 체적변화가 적어 유량 맥동이 적어 정숙한 작동이 된다.

Fig. 1에 나타낸 것을 기준으로, 내부로터의 로브수를 N개라고 하면 외부 로터는 N+1개가 되고, 내부로터의 생성은 Fig. 2에 나타낸 것을 기준으로 설명하게 되면 다음과 같다, 기초원의 반경(R_h) 위를 롤링원(R_r)이 굴러가면서 만들어진 반경을 궤적원의 반경(R_c)이라고 할 때 로브의 수는 다음의 식으로 구해진다1).

$$N = \frac{R_h}{R_r} \tag{1}$$

이때 기초원의 회전 각도를 θ, 롤링원의 회전 각도를 ϕ라고 했을 때 다음과 같은 관계식이 성립하게 된다.

$$R_h \times \theta = R_r \times \phi \tag{2}$$

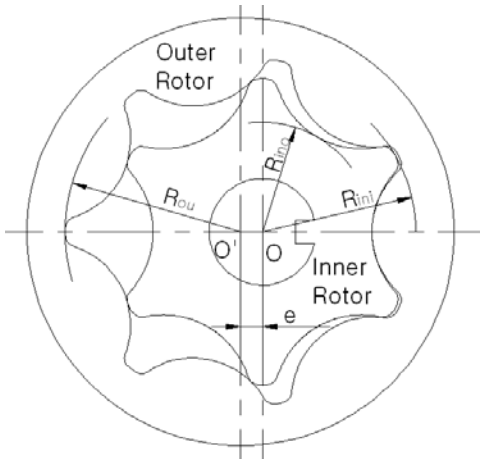


Fig. 1 Schematic view of assembling gerotor tooth

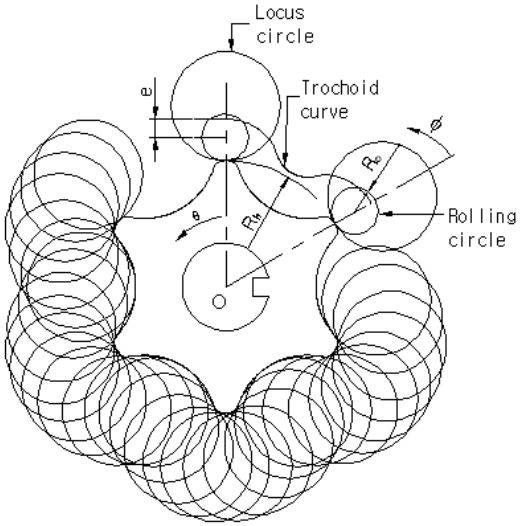


Fig. 2 Generating profile of inner rotor for theoretical analysis

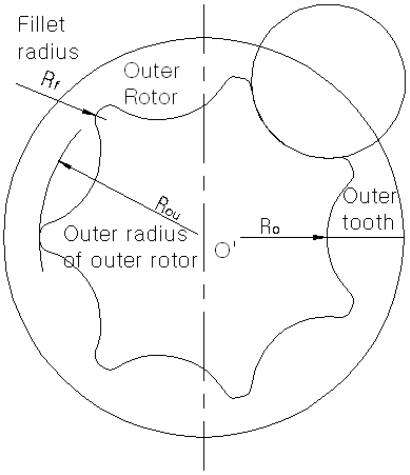


Fig. 3 Generating profile of outer rotor

수학적으로 표현할 수 있는 트로코이드 곡선의 궤적 방정식(x,y)은 다음 식과 같다.

$$x = R_r(N+1)\cos\theta - e\cos(N+1)\theta \quad (3)$$

$$y = R_r(N+1)\sin\theta - e\sin(N+1)\theta \quad (4)$$

식(3)과 식(4)는 트로코이드 곡선을 이용하여 Fig. 2에 나타낸 궤적원의 반경에 의해 만들어진 지로터 치형의 곡선을 (x,y)로 나타내면 다음과 같은 원의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$(X-x)^2 + (Y-y)^2 = (R_r)^2 \quad (5)$$

위의 식을 각 θ로 양변을 미분하면

$$(X-x)\frac{\partial x}{\partial \theta} + (Y-y)\frac{\partial y}{\partial \theta} = 0 \quad (6)$$

로 되고 이것을 정리하면

$$(Y-y) = -K(X-x) \quad (7)$$

로 나타낼 수 있다. 이때 K는 다음과 같다.

$$K = \frac{-R_r\sin\theta + e\sin(N+1)\theta}{R_r\cos\theta - e\cos(N+1)\theta} \quad (8)$$

위에 나타낸 식(5)와 식(7)에서 다음의 식을 얻어낼 수 있다.

$$X = x + \frac{R_c}{\sqrt{1+K^2}}$$

$$Y = y - \frac{R_cK}{\sqrt{1+K^2}} \quad (9)$$

$$X = x - \frac{R_c}{\sqrt{1+K^2}}$$

$$Y = y + \frac{R_cK}{\sqrt{1+K^2}} \quad (10)$$

위의 식(9)와 식(10)중에서 작은 X^2+Y^2 값을 점(x,y)의 지로터 곡선 설계에 이용하면 된다.

외부로터는 일반적으로 많이 사용하는 원형형상으로 설계하기 위해서는 기초원의 반경(R_h)과 롤링원의 반경(R_r)의 일직선상에 놓여있는 궤적원의 반경(R_c)으로 O'를 중심으로 N+1개를 작도하고, 외

부로터의 반경(R_{ou})과 원의 반경(R_o)이 교차하는 부분에서 해석을 통하여 검증된 필릿 반경(R_f)을 작도하면 모서리가 매끈한 외부로터 설계가 된다.

2.2 작동이 원활한 틈새를 고려한 치형[8)]

앞장에서 해석한 이론적인 계산식으로 나타낸 치형 사이의 간극은 접촉하는 것으로 계산되기 때문에 거의 0에 가깝게 되어 있어 회전이 불가능하게 된다. 이런 이유로 틈새(clearance)가 존재하여야 회전할 수 있으므로 두 치형 사이에 간극 조정은 필요하게 된다. 이것은 Fig. 1과 Fig. 2에서 내부로터의 반경을 작게 하거나 외부 로터의 반경을 크게 하거나 하여 두 로터가 원활하게 미끄러지면서 작동할 수 있는 틈새의 고려가 필요하다.

이것을 고려하기 위한 관계식을 편심량 e에 대한 식으로 나타내면

$$e = \frac{R_{ino} - R_{ini}}{2} \tag{11}$$

이 되고 궤적원의 반경(R_c)을 계산하는 것이 가능하기 때문에 내부로터의 반경(R_{ini})은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{ini} = N \times R_r + R_r - e - R_c \tag{12}$$

이 식을 다시 궤적원의 반경(R_c)에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$R_c = (N+1)R_r - e - R_{ini} \tag{13}$$

여기에 나타낸 설계변수인 롤링원의 반경(R_r)과 궤적원의 반경(R_c)이 결정되면 나머지도 쉽게 결정되기 때문에 입력 데이터의 구간마다 곡률반경을 구하여 어느 값 이상 되는 적당한 값을 설정하여 설계에 반영하고, Fig. 3에 나타낸 외부로터의 경우는 외부로터의 반경(R_{ou})을 크게 하거나 원의 반경(R_o)을 작게 함으로서 적당한 틈새를 얻을 수 있다.

2.3 두 치형 사이의 최소거리와 토출 유량 계산

앞서 이론적인 계산식에서 외부로터와 내부로터의 접촉점에 대한 해석을 실시하였다. 이때 나타낸 식을 활용하면 된다. 즉 직각좌표에서 외부로터의 좌표를 x', y', 내부로터의 좌표를 x, y라고 하면 수치계산에 의해 최소 거리의 위치에서 다음의 식으로 각각 구할 수 있다.

$$R_1 = \sqrt{x'^2 + y'^2} \tag{14}$$

$$R_2 = \sqrt{x^2 + y^2} \tag{15}$$

식(14)와 식(15)에서 최소 거리는

$$D_{\min} = R_1 - R_2 \tag{16}$$

로 계산된다.

토출 유량은 N+1개의 로브를 갖는 외부로터와 N개의 로브를 가지는 내부로터가 서로 접촉하여 동일한 방향으로 회전할 때 두 치형 사이의 폐곡면에 해당하는 면적에 축 방향의 길이, 즉 로터의 두께를 곱한 값에 해당하는 체적으로, 이것은 수치적인 적분방법에 의해 구할 수 있다. 이것을 간단하게 표현하기 위해 외부로터 폐곡선이 만드는 면적을 A_{outer}라고 하고, 내부로터의 폐곡선이 만드는 면적을 A_{inner}이라하면 토출량 Q는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = t(A_{outer} - A_{inner}) \tag{17}$$

여기서 t는 로터의 두께이다.

3. 지로터 설계시스템 개발

3.1 설계시스템의 구성

지로터 치형을 이용하여 제작하는 펌프 및 모터의 개발기간 단축 및 최적의 형상을 갖는 로터 치형에 대하여 화면을 통하여 눈으로 직접 확인하고, 펌프의 작동상태를 동영상으로 구동시켜서 점검할 수 있는 시스템이 요구되고 있고, 또한 펌프나 모터 시스템이 요구하는 치형 설계의 품질을 향상시키기 위해서는 주위에서 일반적으로 많이 사용되고 있는 컴퓨터와 상용 소프트웨어를 이용한 설계와 제작 기술이 더 한층 요구되고 있다. 이에 부응하여 본 연구는 앞장에서 논의된 이론적인 근거를 기준으로 Fig. 4에 지로터 치형 설계를 위한 입력변수와 계산결과에 따라 화면에 나타낸 치형의 형상을 직접 확인하고 수정할 수 있는 설계 시스템을 구축하였다. 또한 치형 설계를 위해 입력하는 설계 변수는 Fig. 5에 나타낸 Matlab GUI를 이용한 치형 설계 디스플레이 모니터에서 확인할 수 있다. 이때 지로터 치형 설계를 위한 입력 변수는 롤링원의 반경(R_r)과 내부 로

터의 로브 수(N), 내부 로터의 기초원 반경(R_{ini}), 내부로터의 산 치형 반경(R_{ino}), 외부로터의 골 치형 반경(R_{ou})과 외부로터의 필릿 반경(R_f)을 입력하면 되고, 별도로 1회전당의 토출 유량을 직접 계산하기 위해 로터의 두께t를 입력하면 된다. 그리고 도면을 그릴 때 필요한 출력 값은 기초원의 반경(R_h)과 궤적원의 반경(R_c), 두 치형 중심사이의 거리인 편심거리(e), 토출 유량(Q)과 치형의 형상을 화면에 나타내어 눈으로 즉시에 확인할 수 있다. 이때 화면에 나타낸 치형의 형상이 사용하기에 일상적이지 않거나 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 입력변수가 적절하지 않았을 때 펜(pan)과 줌(zoom)기능을 활용하여 내부로터의 치형 설계가 부정확하게 된 것이 확인되면 다시 설계 치형에 적당한 입력 변수를 수정하여 입력함으로서 설계의 자유도를 높일 수 있도

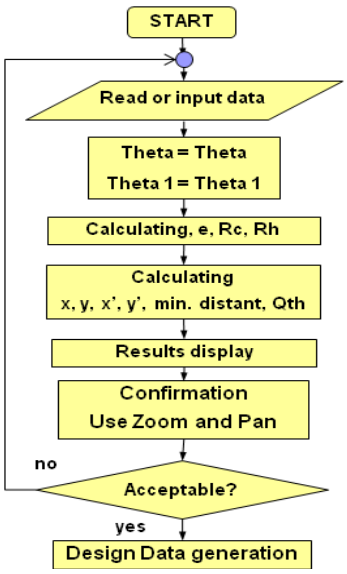


Fig. 4 Flow chart for gerotor tooth design

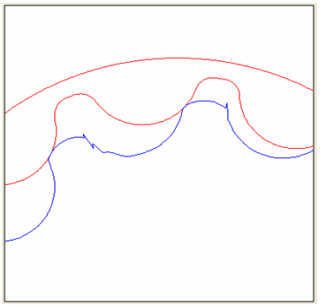


Fig. 6 Wrong designed gerotor tooth

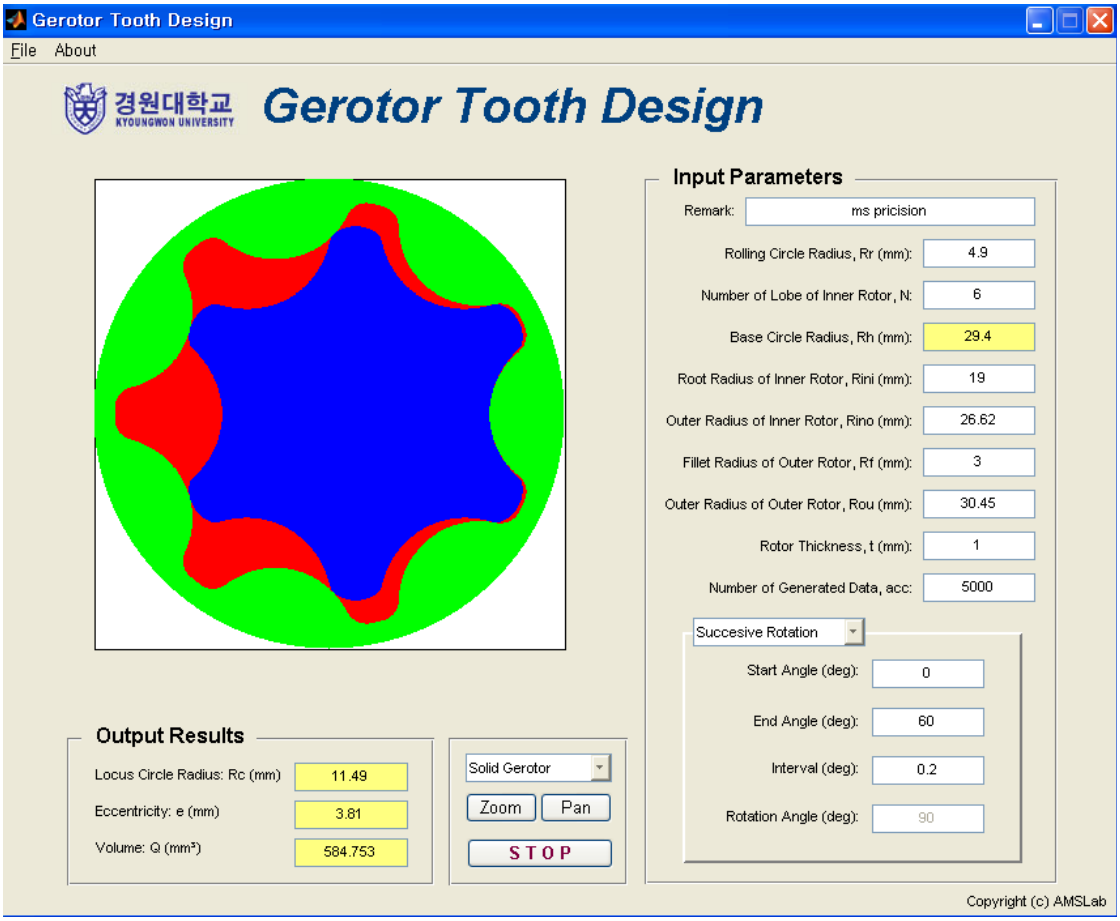


Fig. 5 Display monitor on output results and input parameter for Gerotor tooth design

록 구성하였다. 또한 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 치형을 일체로 나타낸 솔리드 형상과 Fig. 8에 나타낸 것과 같은 치형의 윤곽(contour)만을 나타내는 형태로 표현이 가능하다.

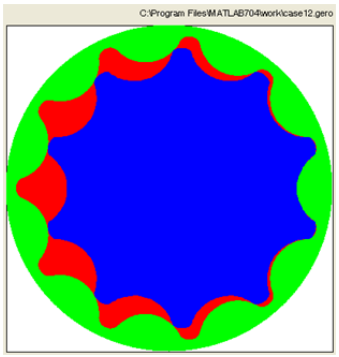


Fig. 7 Solid type of gerotor tooth (10 lobes)

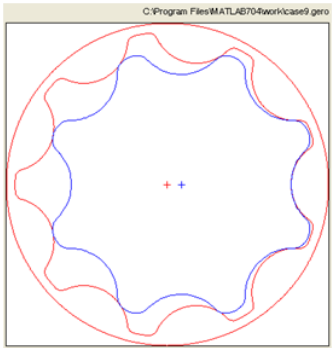
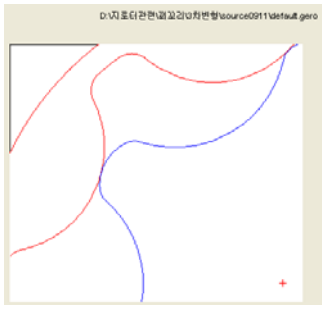
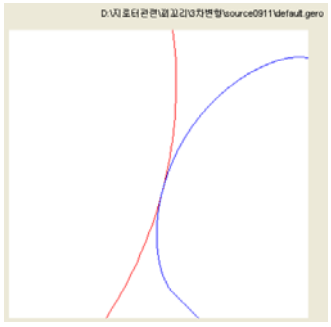


Fig. 8 Contour type of gerotor tooth (8 lobes)



(a) zoom in



(b) zoom out

Fig. 9 A function of zoom in and out

그리고 설계된 내부로터와 외부 로터 사이의 최소 거리를 확인하기 위하여 Fig. 8에서와 같이 확대와 축소 기능을 활용하면 설계에서 발생하는 치형 사이의 접촉점과 간섭 상태를 확인 할 수 있다.

3.2 토출 유량 및 맥동해석

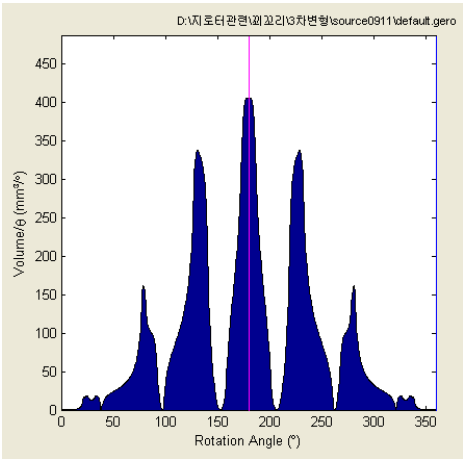
단위 두께당 토출 유량과 유량 맥동의 크기를 Fig. 10에 나타내었다. 내부로터의 로브수가 짝수인 경우 로터가 회전하게 되면 흡입 포트에서 흡입량은 0°에서 부터 서서히 증가하다가 180°에서 최대가 된 후 체적이 서서히 감소하면서 토출측으로 유체를 이송시키게 된다. 이때 로브의 개수가 많은 경우에는 치형 사이의 공간 변화량이 작아서 유량 맥동의 크기가 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서 구동토크와 유량 맥동 등 시스템의 특성에 적절한 로브 개수를 설정하여야 하고 다양한 치형을 자유롭게 설계를 할 수 있는 설계 시스템이 필요하게 된다.

3.3 도면 작성 및 시작품 제작의 예

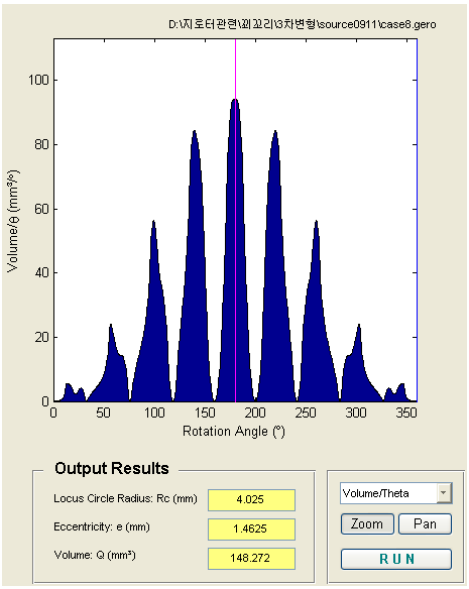
공학용 해석에 널리 이용하고 있는 Matlab GUI를 활용하여 현실성이 있는 내부로터 및 외부로터의 형상을 동시에 설계하고 각각의 변수에 대하여 해석을 실시하고 그 결과를 최종적으로 FIg. 11에 나타낸 것과 같은 도면으로 완성시켜 시험용 샘플을 제작한다. 시험용 샘플은 일반적으로 방전 와이어커팅 장치(EDM)를 이용하여 가공하며, 내부로터를 제작하기 위해서는 최소한 1개 로브 치형에 대한 x, y좌표만 있으면 된다. 이런 방법으로 제작된 샘플의 사진을 Fig. 12에 나타내었다. 그러나 자동차의 부품으로 사용하는 경우에는 수량이 많고 치형 형상이 복잡하기 때문에 앞서 설명한 방법으로는 가공할 수가 없고, 금형을 제작하여 소결 재료를 이용한 프레스 가공이 일반적이다. 이때 사용되는 재료도 다양하여 시스템에 적절한 사양을 결정하는 것도 매우 중요하리라 판단된다.

4. 결 론

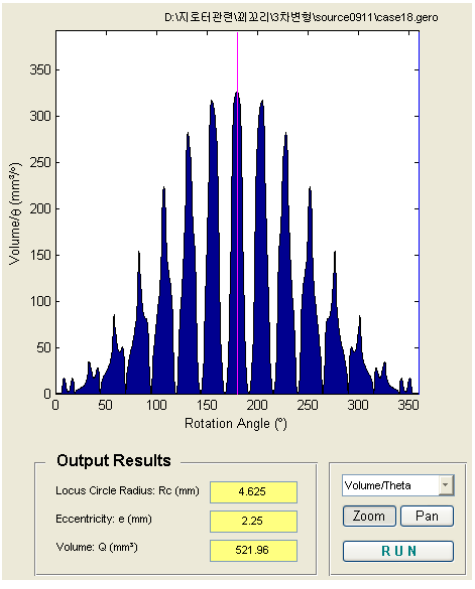
본 논문에서는 유압펌프 및 모터로 자동차나 산업기계 등 많은 부분에서 사용되고 있는 지로터의 내부로터 와 외부로터를 동시에 설계하는 이론 방정식을 정립하였고, 이렇게 정립된 방정식으로 매트랩 GUI를 활용하여 치형 설계를 쉽게 할 수 있는 도구를 개발하게 되었다. 이렇게 개발된 도구는 치형 설계뿐만 아니라 토출 유량과 유량 맥동의 크기, 두 치형 사이의 최소 간극 계산과 펜과 확대 및 축소 기능을 활용하여 치형 사이의 간섭이나 접촉점을 바로



(a) 6 lobes



(b) 8 lobes



(c) 14 lobes

Fig. 10 A flow rate and flow fluctuation of gerotor pump

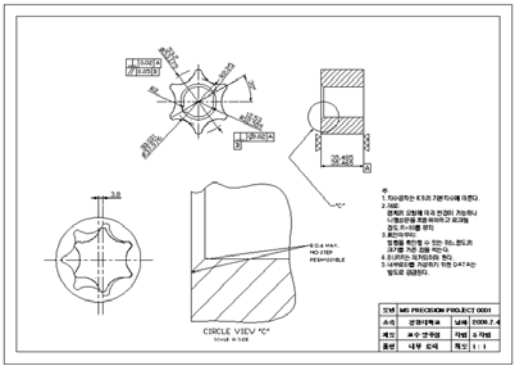


Fig. 11 A drawing for inner rotor

Fig. 12 Samples manufactured by EDM

설계 도구 화면에서 확인할 수 있도록 하였다.

본 메트랩 GUI를 활용한 지로터 치형 형상 설계 도구시스템의 특징은 다음과 같다.

1. 외부로터와 내부로터를 동시에 설계할 수 있는 입력 변수를 정립함으로서 설계 및 해석 시간을 단축시킬 수 있고, 최적의 치형 형상을 찾아낼 수 있다.
2. 두 치형 로터 사이의 간극을 조정하여 가공을 위한 치형 곡선 수정방법에 방안을 제시하였다.
3. 설계 변수에 치형과 설계와 동시에 토출 유량, 유량 맥동을 동시에 계산하여 그 크기를 눈으로 직접 확인할 수 있다.
4. 개발된 지로터 치형 설계 도구는 업체의 설계 요구 조건에 적절하게 대응 할 수 있고, 기존에 설계한 자료 DB를 구축하는 것이 쉽기 때문에 다양한 사양을 제시할 수 있을 것이다.

이 시스템을 이용하여 개발된 설계 자료는 물리적인 의미가 명확하기 때문에 설계시간의 단축 및 요구 조건에 맞는 치형을 설계하는데 유용하게 사용될 수 있다. 다만 최적화를 위한 연구는 향후에도 꾸준히 진행하여야 할 것이다.

후 기

본 연구를 위하여 많은 협조와 지원을 아끼지 않은 Scilaw의 윤원석 대표께 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

참고 문헌

1) J. S. Jang, J. W. Lee, D. C. Han, M. R. Cho, “A Study on the Tooth Design Program Development of Gerotor Pump/Motor”, Journal of KSTLE, Vol. 12, No. 3, pp. 100～106. 1996.

2) C. B. Tsay, C. Y. Yu, "Mathematical Model for the Profile of Gerotor Pumps," J. of the CSME, Vol. 10, No. 1, pp 44～47. 1989.

3) Y. Saegusa, K. Urasshima, M. Sugimoto, M. Onoda, and T. Koiso, "Development of Oil-Pump Rotors with a Trochoidal Tooth Shape," SAE Paper 840454, 1984.

4) C. H. Kim, D. I. Kim, H. S. Ahn, T. H. Chong and s. c. Lee, “On the Design Parameters of Gerotor Hydraulic Motors”, Journal of KSTLE, Vol. 15, No. 1, pp. 17～23. 1996.

5) J. H. Kim, J. H. Park, S. Y. Jung, J. H. Son, C. Kim, "Optimal Design of Tooth Profile for High-Efficiency Gertor Oil Pump", J. Of the KSPE, Vol. 22, No. 5, pp. 28～36. 2005.

6) J. H. Kim, C. Kim, C. H. Kim, "Optimum Design on the lobe shapes of Gertor Oil Pump", J. Of the KSPE, Vol. 23, No. 4, pp. 124～131. 2006.

7) S. M. Kwon, H. C. Nam, L. Lu, J. H. Shin“A Study on Optimal Wear Design for a Gerotor Pump", J. of the KSME-A, Vol. 33, No. 1, pp. 82～88. 2009.

8) J. S. Jang, " Modify Method of Trochoid Tooth Profile", Korea have Patented, No. 108753, 1996.